8 月 August
2019，62(8)：979－986

昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA

http：//www.insect.org.cn
doi：10.16380/j.kcxb.2019.08.010

重阳木锦斑蛾越冬幼虫的耐寒性变化

杨海博，胡镇杰，董钧锋，朱品红，李定旭[*]

（河南科技大学林学院，河南洛阳 471000）

摘要：【目的】重阳木锦斑蛾 *Histia rhodope* 是为害重阳木 *Bischofia polycarpa* 的重要害虫之一。本研究旨在了解重阳木锦斑蛾幼虫的抗寒能力，并为探讨抗寒机理提供理论基础。【方法】在越冬期的不同阶段（2017 年 11 月 7 日、2017 年 12 月 7 日、2018 年 1 月 5 日、2018 年 2 月 4 日和 2018 年 3 月 5 日）分别采集室外重阳木锦斑蛾越冬幼虫，对其体重、过冷却点、结冰点、含水量、脂肪、总糖和总蛋白质含量进行测定。【结果】重阳木锦斑蛾幼虫的过冷却点在越冬期不同月份有显著差异，与环境温度呈显著正相关（$P<0.05$），最低值出现在 1 月份，为 −15.26℃，最高值出现在 3 月份，为 −13.30℃；结冰点变化趋势与过冷却点一致；体重和脂肪含量在越冬期间逐渐下降，与过冷却点无相关性（$P>0.05$）；过冷却能力随着虫体游离水含量的升高而降低，随其降低而升高，而结合水含量的变化趋势恰好相反；总糖含量在 11 月最高，为 14.95 μg/mg，显著高于 3 月份的 5.07 μg/mg；总蛋白质含量在越冬期间呈先升高后降低的趋势，在 1 月份含量最高，为 23.66 μg/mg，显著高于 11 月份的含量（16.69 μg/mg）。【结论】重阳木锦斑蛾幼虫的耐寒性在越冬期间随气温的降低逐渐增强，随气温的回升又逐渐减弱；蛋白质可能是该虫重要的耐寒物质。

关键词： 重阳木锦斑蛾；越冬幼虫；耐寒性；过冷却点；生化物质

中图分类号： Q968　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 0454-6296(2019)08-0979-08

Changes in the cold hardiness of overwintering larvae of *Histia rhodope* (Lepidoptera：Zygaenidae)

YANG Hai-Bo，HU Zhen-Jie，DONG Jun-Feng，ZHU Pin-Hong，LI Ding-Xu[*] (Forestry College，Henan University of Science and Technology，Luoyang，Henan 471000，China)

Abstract：【Aim】*Histia rhodope* is one of the major pests of *Bischofia polycarpa*. This study aims to investigate the cold hardiness of *H. rhodope* larvae and to provide a theoretical basis for exploring its cold resistance mechanisms.【Methods】The body weight，supercooling point (SCP)，freezing point (FP) and contents of water，fat，total sugar and total protein in overwintering larvae of *H. rhodope* were measured at different overwintering stages (November 7，2017，December 7，2017，January 5，2018，February 4，2018，and March 5，2018).【Results】There were significant differences in the SCP of *H. rhodope* larvae among the different overwintering months，and SCP showed a significant positive correlation with the ambient temperature ($P<0.05$). The lowest mean SCP (−15.26℃) occurred in January，and the highest (−13.30℃) occurred in March. The variation tendency of FP was consistent with that of SCP. The fresh weight and fat content decreased gradually during the overwintering period，and there was no correlation between the SCP and the fresh weight and fat content ($P>0.05$). The supercooling capacity increased as the free water content decreased，while reduced as the free water content increased. However，the change trend of bound water content was opposite to that of the free

---

基金项目：河南科技大学博士启动基金（13480048）；河南省科技攻关项目（182102110255）

作者简介：杨海博，男，1986 年 2 月生，河南安阳人，博士，讲师，研究方向为农业昆虫与害虫防治，E-mail：hbyang@haust.edu.cn

[*] 通讯作者 Corresponding author，E-mail：ldigxu@163.com

收稿日期 Received：2019-03-22；接受日期 Accepted：2019-05-09

water content. The total sugar content in November was the highest (14.95 μg/mg), which was significantly higher than that in March (5.07 μg/mg). The total protein content increased first and then decreased during overwintering, and reached the highest value in January (23.666 μg/mg), which was significantly higher than that in November (16.69 μg/mg). 【Conclusion】 The cold hardiness of overwintering larvae of *H. rhodope* increases gradually with the decrease of ambient temperature and then weakens with the increase of ambient temperature. Proteins may be the important cold-resistant substance in *H. rhodope*.

Key words: *Histia rhodope*; overwintering larva; cold hardiness; supercooling point; biochemical substances

昆虫属于变温动物,温度对其生长发育和存活具有重要的影响(Wang and Kang, 2005),昆虫的耐寒性直接决定其地理分布和发生动态(景晓红和康乐, 2004; 崔双双和贺一原, 2011)。在长期的进化过程中昆虫形成了多种耐寒对策(景晓红和康乐, 2002),主要分为两类:一类是生态(或行为)对策,当冬季低温来临时,昆虫通过行为活动躲避低温的伤害,如迁飞、休眠和滞育等;另一类是生理对策,通过调节体内代谢机制和积累抗寒物质等来提高耐寒性(郭海波等, 2006; 史彩华等, 2016)。根据昆虫抗寒性的生理生化耐寒机制,常分为耐冻或耐结冰型(freezing tolerance)和避免结冰(freezing avoidance)或结冰敏感型(freezing susceptibility)两类。前者依赖提高过冷却点(supercooling point, SCP)来诱导胞外结冰,使胞内亚细胞结构免受损伤;后者通过降低过冷却点避免结冰来增强抗寒力(Lee, 1991; Bale, 2002)。绝大多数昆虫属于后一类,进入过冷却状态是北半球温带和寒带地区昆虫采取的主要越冬策略。因此,过冷却点和结冰点(freezing point, FP)常作为衡量昆虫耐寒性强弱的重要指标(景晓红和康乐, 2004; 欧阳芳和戈峰, 2014)。已有大量研究表明,越冬昆虫的耐寒性与其体内的水分、脂肪、糖类、蛋白质及小分子抗冻保护剂等物质含量关系密切(欧阳芳和戈峰, 2014)。测定昆虫越冬期不同阶段的耐寒性指标,明确其耐寒能力和抗寒机制,对于准确预测来年种群发生趋势以及制定科学防控措施等具有重要意义。

重阳木锦斑蛾 *Histia rhodope* 又名重阳木斑蛾、重阳木帆锦斑蛾(黄邦侃, 1980; 李世广等, 2006),属于鳞翅目(Lepidoptera)斑蛾科(Zygaenidae),是园林绿化和行道树种——重阳木 *Bischofia polycarpa* 的重要食叶性害虫。为害严重时常造成整株树叶被取食殆尽,甚至干枯死亡,影响树木生长和城市景观;同时,老熟幼虫吐丝下地化蛹的习性,高峰期常见树冠下虫丝飘荡,对行人活动有较大干扰。该虫在国外分布于印度、缅甸、印度尼西亚等国,在国内主要分布于长江中下游地区和华南各省(自治区)(黄邦侃, 1980; 樊敏, 2013)。近年来,该虫为害区域有进一步北扩趋势,已在山东枣庄(秦昭鹏等, 2018)、河南洛阳等地发现该虫为害,且为害日趋严重。结合连续数年的野外观察和室内试验,我们初步认为该虫在洛阳一年发生 4 代,以末代休眠的老熟幼虫在重阳木树皮裂缝、地面落叶、砖缝以及墙角等处结茧越冬(未发表)。关于重阳木锦斑蛾的生物学观察和防治技术研究较多(黄邦侃, 1980; 李世广等, 2006; 李玉秀, 2013),但抗寒方面尚无报道。本研究测定了重阳木锦斑蛾幼虫的耐寒性及其在越冬期不同阶段的变化,以探讨其耐寒能力及抗寒机制,以期为推测其潜在的分布、为害区域提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

2017 年 10 月下旬于河南省洛阳市隋唐城遗址植物园(112.45°E, 34.64°N)重阳木树林间采集重阳木锦斑蛾越冬代老熟幼虫。将采集的幼虫装入 50 格冻存盒(长 × 宽 × 高 = 150 mm × 70 mm × 60 mm)内,每个格子放 1 头幼虫任其结茧,带回后在室外自然条件下存放、备用。分别于 2017 年 11 月 7 日(立冬)、2017 年 12 月 7 日(大雪)、2018 年 1 月 5 日(小寒)、2018 年 2 月 4 日(立春)和 2018 年 3 月 5 日(惊蛰)取正常结茧幼虫作为试虫。

1.2 环境温度监测

用 U12-012 型 HOBO 温湿度记录仪(美国 Onset 公司)记录室外温湿度。根据监测结果,统计月平均气温、月平均最低气温和月平均最高气温。

1.3 体重、过冷却点和结冰点的测定

在越冬期不同月份从供试虫源中选取健康幼虫

进行测定，每次测定过冷却点之前，将重阳木锦斑蛾越冬幼虫从虫茧中小心取出，单头编号并用万分之一天平［PL203，梅特勒-托利（上海）有限公司］称鲜重（fresh weight，FW）。然后采用热电偶原理进行 SCP 和 FP 测定（刘玉娟等，2014）。将待测幼虫放入 1.5 mL Eppendorf 离心管中，将昆虫过冷却仪（SUN-V，北京鹏程电子科技中心）热敏电阻感温探头深入管内，并用脱脂棉塞紧使感温探头与虫体腹面紧密接触，然后置于超低温箱内（DW-HL668 型，中科美菱低温科技股份有限公司），以 1℃/min 降温，虫体温度变化通过计算机及其配套软件进行自动记录，实时绘制虫体温度变化曲线。每次测定 34～57 头。

1.4　水分和脂肪含量的测定

将 1.3 节测定完过冷却点的单头幼虫编号并称鲜重（FW），然后置于 60℃ 恒温烘箱（ZFD-5250，上海智城分析仪器制造有限公司）中烘烤 24 h 至恒重，再次称干重（dry weight，DW），两者差值即为单头游离水含量；在每次测完游离水后，再将测试虫体置于 105℃ 烘箱中烘烤 24 h 后再称重，两次称重差值即为结合水含量（刘玉娟等，2014）。每次测定 14～24 头。

测完干重后，将不同时期的幼虫在 60℃ 烘箱中烘干研磨。加氯仿-甲醇混合液（2∶1，v/v）匀浆。2 600 r/min 离心 10 min 后，弃上清液，重复离心 1 次。残渣置于 60℃ 烘箱烘烤 48 h 至恒重（lean dry weight，LDW）。虫体脂肪含量（%）=［（DW－LDW）/DW］×100%（刘玉娟等，2014）。重复 5～6 次。每次测定 10 头。

1.5　虫体蛋白质和总糖含量的测定

每次取 6 头幼虫测定体内蛋白质和总糖含量，每个处理重复 5～6 次。蛋白质含量测定：采用考马斯亮蓝比色法（Bradford 法）测定，蛋白质在酸性溶液中与考马斯亮蓝 G-250 结合，在 595 nm 处有吸收峰。

取单头越冬幼虫称重后置于 15 mL 试管中，加入 1 mL 蒸馏水匀浆，4 mL 10% 三氯乙酸溶液冲洗匀浆器，5 000 r/min 离心 5 min，取上清液，用 2 mL 10% 三氯乙酸溶液溶解沉淀，反复离心 2 次。上清液加 10% 三氯乙酸溶液补足 10 mL。测定时取 0.1 mL 样品液经蒽酮法测定其总糖含量（刘兆良等，2017）。

1.6　数据分析

实验所得数据用平均值 ± 标准误（*SE*）来表示。虫体含水量、脂肪含量的数据经反正弦转换后进行方差分析，其余各指标则直接进行方差分析，并用 Turkey 氏 HSD 法进行多重比较；用 Pearson 相关系数法分析过冷却点、结冰点与各指标的相关性（$P = 0.05$）。所有的统计分析采用 SPSS 21.0 软件完成。

2　结果

2.1　越冬期间重阳木锦斑蛾幼虫 SCP 和 FP 的变化及与体重和环境温度的关系

由表 1 可知，在不同越冬时期重阳木锦斑蛾幼虫的体重差异显著（$F = 15.62$；$df = 4,217$；$P < 0.001$）。越冬初期（11 月）体重最重，显著高于随后各时期；越冬末期（3 月）体重最轻。对各时期越冬幼虫的体重与过冷却点及结冰点进行相关性分析可知，体重与二者之间无相关性（SCP：$r = -0.10$，$P = 0.88$；FP：$r = 0.62$，$P = 0.26$）。

表 1　不同越冬阶段重阳木锦斑蛾幼虫的体重、过冷却点和结冰点

Table 1　Body weight, supercooling point and freezing point of *Histia rhodope* larvae at different overwintering stages

日期（年-月-日）Date (year-month-day)	体重（mg）Body weight		过冷却点（℃）Supercooling point				结冰点（℃）Freezing point		
	样本数 Number of samples	平均值 ± 标准误 Mean ± *SE*	样本数 Number of samples	平均值 ± 标准误 Mean ± *SE*	最高值 Max	最低值 Min	平均值 ± 标准误 Mean ± *SE*	最高值 Max	最低值 Min
2017-11-07	34	232.58 ± 9.26 a	56	−14.31 ± 0.48 ab	−5.65	−19.15	−6.49 ± 0.27 a	−2.70	−10.81
2017-12-07	48	184.10 ± 8.92 b	50	−14.64 ± 0.47 ab	−6.08	−20.11	−7.71 ± 0.39 ab	−3.57	−15.45
2018-01-05	50	173.21 ± 6.89 bc	39	−15.26 ± 0.40 b	−8.82	−20.55	−8.48 ± 0.50 b	−3.19	−18.44
2018-02-04	35	157.45 ± 7.23 bc	39	−15.01 ± 0.45 ab	−6.71	−19.52	−7.61 ± 0.50 ab	−3.84	−16.37
2018-03-05	55	150.43 ± 5.89 c	55	−13.30 ± 0.49 a	−4.10	−18.92	−7.37 ± 0.41 ab	−2.24	−15.00

表中同列数据（平均值 ± 标准误）后有不同字母者表示平均数差异显著（Tukey 氏 HSD 检验，$P < 0.05$）。Data (mean ± *SE*) in the same column followed by different letters are significantly different (Tukey's HSD test, $P < 0.05$). 下表同 The same for the following tables.

重阳木锦斑蛾越冬幼虫过冷却点和结冰点在不同时期差异显著（SCP：$F=2.667$；$df=4,234$；$P=0.033$；FP：$F=3.100$；$df=4,234$；$P=0.016$）。其中，过冷却点以 1 月最低（－15.26℃），但与 11，12 及 2 月之间的差异并不显著（$P>0.05$）；以 3 月份为最高（－13.30℃），显著高于 1 月份的过冷却点，但与 11，12 和 2 月的差异不显著（$P>0.05$）。结冰点则以 11 月份为最高（－6.49℃），以 1 月份最低（－8.48℃），且 11 月份的结冰点显著高于 1 月份的，但这两个时期与其余 3 个时期的差异并不显著（$P>0.05$）。

结合外界气温观测结果可知，一年中最冷的时期（1 月平均气温 1.96℃），重阳木锦斑蛾越冬幼虫的过冷却点和结冰点最低，而温度相对较高的 11 月（月平均气温 10.82℃）或 3 月（月平均气温 13.42℃），其过冷却点、结冰点最高。相关性分析表明，重阳木锦斑蛾越冬幼虫过冷却点与同期月平均最低气温和月平均最高气温呈显著正相关（$P<0.05$）（图 1），即重阳木锦斑蛾越冬幼虫过冷却点随着环境温度的降低而降低。但重阳木锦斑蛾越冬幼虫结冰点与同期月平均最高气温和月平均最低气温无相关性（$P>0.05$）。

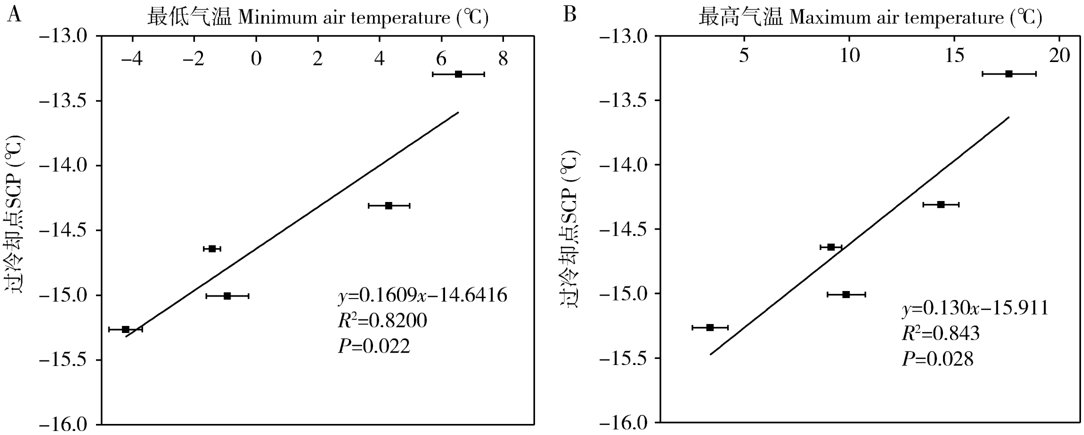

图 1 重阳木锦斑蛾越冬幼虫过冷却点与月平均最低气温（A）和月平均最高气温（B）回归分析

Fig. 1 Regression analysis between the supercooling point (SCP) of overwintering larvae of *Histia rhodope* and the mean monthly minimum air temperature (A) and maximum air temperature (B)

2.2 越冬期间重阳木锦斑蛾幼虫的含水量变化

表 2 结果表明，整个越冬期间重阳木锦斑蛾幼虫的游离水含量显著高于结合水含量，前者呈先降后升趋势而后者呈相反动态。游离水和结合水含量在不同越冬时期差异显著（游离水：$F=669.800$；$df=4,99$；$P<0.001$；结合水：$F=10.227$；$df=4,99$；$P<0.001$）。其中，11 月份幼虫的游离水含量最高（73.79%），而 1 月份最低（65.84%），显著低于 11，12 和 2－3 月的含水量（$P<0.05$）。结合水含量的变化趋势则与游离水相反，以 11 月的含量最低（1.31%），而 1 月份最高（4.83%），显著高于 11，12 和 3 月（$P<0.05$）。

表 2 不同越冬阶段重阳木锦斑蛾幼虫的含水量

Table 2 The water content in *Histia rhodope* larvae at different overwintering stages

日期（年-月-日） Date (year-month-day)	样本数 Number of samples	游离水含量（%） Free water content	结合水含量（%） Bound water content
2017-11-07	24	73.79 ± 0.26 a	1.31 ± 0.16 d
2017-12-07	21	71.87 ± 0.79 ab	1.73 ± 0.15 cd
2018-01-05	24	65.84 ± 1.26 c	4.83 ± 0.25 a
2018-02-04	14	69.75 ± 1.28 b	3.37 ± 0.27 ab
2018-03-05	21	70.32 ± 0.64 b	2.93 ± 0.79 bc

对越冬幼虫体内含水量与结冰点相关性分析（图 2）可知，体内游离水含量与同期结冰点呈显著正相关（$P=0.036$），而结合水含量与同期结冰点无显著相关性（$P=0.085$），说明幼虫体内游离水含量的降低会使结冰点降低，而结合水含量的升高则有使结冰点降低的趋势；再结合表 2 结果分析可知，重阳木锦斑蛾越冬幼虫通过调节体内两种含水量比例来增强其耐寒性。而越冬幼虫过冷却点与体内含水量无相关性（$P>0.05$）。

2.3 越冬期间重阳木锦斑蛾幼虫体内脂肪、总糖和蛋白质含量变化

表 3 结果表明，重阳木锦斑蛾越冬幼虫体内脂肪含量在不同越冬时期差异显著（$F=4.083$；$df=4,23$；$P=0.012$）。以 11 月脂肪含量最高（40.91%），随着越冬时间的延长，脂肪含量逐渐下

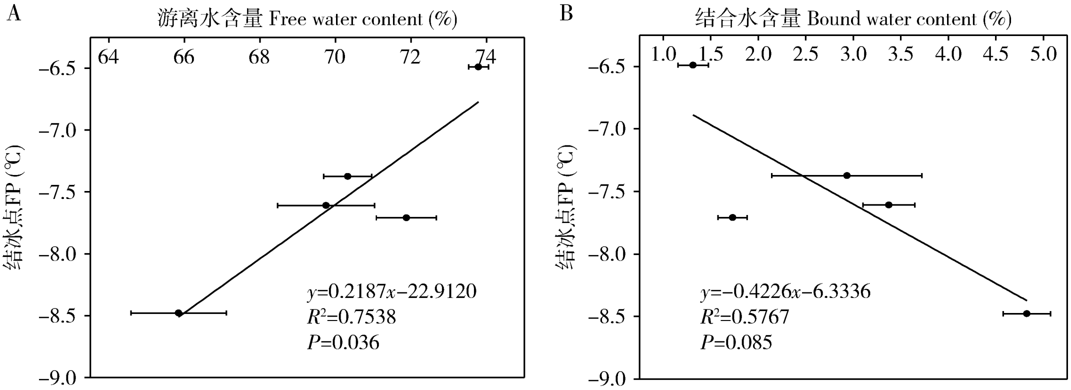

图 2　重阳木锦斑蛾越冬幼虫结冰点与体内游离水（A）和结合水（B）含量回归分析

Fig. 2　Regression analysis between the freezing point (FP) of overwintering larvae of *Histia rhodope* and the contents of free water (A) and bound water (B)

表 3　不同越冬阶段重阳木锦斑蛾幼虫体内脂肪、总糖和蛋白质含量

Table 3　Fat, total sugar and protein contents in *Histia rhodope* larvae at different overwintering stages

日期（年-月-日） Date (year-month-day)	样本数 Number of samples	脂肪含量（%） Fat content	样本数 Number of samples	总糖含量（μg/mg） Total sugar content	样本数 Number of samples	蛋白质含量（μg/mg） Protein content
2017-11-07	5	40.91 ±1.09 a	5	14.95 ±1.02 a	6	16.96 ±1.08 b
2017-12-07	6	39.22 ±0.75 ab	5	13.23 ±1.90 a	6	18.44 ±0.53 b
2018-01-05	6	34.35 ±1.27 ab	6	13.75 ±1.32 a	6	23.66 ±0.29 a
2018-02-04	5	33.83 ±0.70 ab	5	11.67 ±0.82 ab	6	22.72 ±0.76 a
2018-03-05	6	31.42 ±3.69 b	6	5.07 ±1.09 b	6	22.08 ±0.69 a

降，至 3 月时含量最低（31.42%），与 11 月的差异显著（$P<0.05$），但与其他各时期差异不显著（$P>0.05$）。此外，越冬幼虫的脂肪含量与过冷却点无相关性（$P=0.722$）。

总糖含量在重阳木锦斑蛾幼虫不同越冬时期也有显著差异（$F=5.856$；$df=4,22$；$P=0.003$）。以 11 月含量最高（14.95 μg/mg），3 月含量最低（5.07 μg/mg），且显著低于 11，12 和 1 月（$P<0.05$），但与 2 月差异不显著（$P>0.05$）。越冬幼虫的总糖含量与过冷却点无相关性（$P=0.076$）。

蛋白质含量在不同越冬阶段也存在显著差异（$F=16.352$；$df=4,25$；$P<0.001$）。在 1 月份含量最高，为 23.66 μg/mg，显著高于 11 月和 12 月（$P<0.05$），虽然随后的含量有下降，但与越冬中后期（1－3 月）之间差异不显著（$P>0.05$）。越冬幼虫的蛋白质含量与过冷却点无相关性（$P=0.714$）。

3　讨论

生活在温带和寒带地区的昆虫，每年都要经历冬季长期低温、光周期较短、食物短缺等不利条件，通过长期的低温驯化已经形成一套完善的适应策略，昆虫的耐寒性季节性变化与环境温度关系紧密。过冷却点是判定昆虫耐寒性强弱的重要指标（Sømme, 1996；景晓红和康乐，2004；欧阳芳和戈峰，2014）。通常情况下，过冷却点越低，耐寒性越强，在低温下的存活率就越高（Lee, 1991）。本研究通过测定重阳木锦斑蛾越冬幼虫过冷却点发现，其耐寒能力具有季节性变化，表现为越冬前期（11 月）和越冬后期（3 月）的耐寒性较低，越冬中期（1 月）的耐寒性较高，且过冷却点在越冬前期（11 月）和越冬中期（1 月）无显著差异，而与越冬末期（3 月）存在显著差异，说明重阳木锦斑蛾越冬幼虫通过降低过冷却点来提高其耐寒能力。二化螟 *Chilo suppressalis*、二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 和光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 等昆虫的耐寒能力也有季节性变化，且变化趋势与该虫一致（強承魁等，2008；刘玉娟等，2014；Feng *et al.*, 2016）。通过对 SCP 与环境温度相关性分析，发现 SCP 与月平均最低温度和最高温度呈显著正相关（图 1：A，B）。重阳木锦斑蛾越冬幼虫的平均最低 SCP 在 －15℃ 左右，通过对洛阳市 50 余年（1961 －2017）历史气象资料查询，仅 1969 年冬季最低温度低于 －15℃。据此推断，作为近年扩散蔓延而来的新害虫，重阳木锦

斑蛾基本能够适应当地冬季的低温胁迫而越冬。

昆虫鲜重和体内水分状态的变化与耐寒能力有密切关系（Zachariassen *et al*., 2008; Xu *et al*., 2011）。本研究发现重阳木锦斑蛾越冬幼虫鲜重随着越冬时间的延长持续下降，从越冬初期体重最高值降至越冬末期的最低值，这与二点委夜蛾越冬幼虫研究结果（刘玉娟等，2014）一致，可能是由于越冬期间持续消耗体内能量物质所致。昆虫在越冬过程中，体内含水量的变化和水分状态与其抗冻能力有很大关系，许多昆虫在越冬时通过减少体内水分含量或提高结合水与游离水的比例（Worland, 1996），来降低过冷却点和结冰点，从而安全度过低温环境。重阳木锦斑蛾越冬幼虫体内游离水含量在越冬初期（11 月）最高，越冬中期（1 月）最低，越冬末期（3 月）含量又回升，结合水含量变化趋势与此相反。其结冰点与游离水含量呈显著正相关，而与结合水含量无显著相关性（图 2：A, B）。本研究结果与二点委夜蛾、华山松小蠹 *Debdroctons armandi* 等幼虫类似，在越冬中期会降低体内游离水含量或部分转化为结合水，通过提高体液溶质浓度降低过冷却点，避免胞内或其他重要部位遭冷害（刘玉娟等，2014; Wang *et al*., 2017）。因此，重阳木锦斑蛾越冬幼虫可能借助体内游离水含量变化来调控其耐寒能力。

脂肪是昆虫越冬期间的能量来源（Sinclair, 2015），很多昆虫都会在越冬前储存脂肪，如异色瓢虫 *Harmonia axyridis*、黄连木种子小蜂 *Eurytoma plotnikovi* 和华山松小蠹等（赵静等，2008; Mohammadzadeh *et al*., 2017; Wang *et al*., 2017），在越冬前期体内有很高的脂肪含量，以备越冬所需。在本研究中，重阳木锦斑蛾越冬幼虫体内脂肪含量在越冬初期最高，在越冬过程中呈下降趋势，在越冬末期降到最低。这是由于在整个越冬期间，幼虫主要依靠体内储存的脂肪进行最基本的代谢来维持生存。

糖类物质是昆虫越冬期间维持新陈代谢的直接能量来源，总糖含量可作为昆虫耐寒性强弱的一个评价指标（强承魁等，2008）。本研究结果表明，重阳木锦斑蛾幼虫在越冬初期总糖含量最高，进入越冬期后，含量呈缓慢下降趋势，直到越冬末期含量急剧降到最低。造成这一现象的原因可能与重阳木锦斑蛾越冬幼虫的取食有关，在越冬前，老熟幼虫大量取食，为越冬做准备，此时虫体内总糖含量较高；而进入越冬期后，新陈代谢缓慢，作为能量直接来源的糖分逐渐被消耗而下降；在越冬后期，随着温度的回升，越冬幼虫复苏，为化蛹做准备，体内代谢速率加快，糖类被大量消耗而含量急剧下降。这一结果与七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 和日本龟蜡蚧 *Ceroplasts japonicus* 相似（任小云等，2015; 刘兆良等，2017）。昆虫能量代谢所用的糖类物质包括消化吸收的单糖和血淋巴中储存的海藻糖及肌肉、脂肪体和血细胞中储存的糖原。不少研究认为，糖原和海藻糖在昆虫越冬期间发挥重要作用（Saeidi and Moharramipour, 2017; Feng *et al*., 2018; 王德意等，2018），本研究只测定了总糖含量，没有涉及到这些物质在越冬期间的变化，这是本研究的不足之处，也是我们下一步研究的主要内容。

蛋白质是生命活动的主要承担者，同时也是许多昆虫抵抗低温的重要耐寒物质，尤其以抗冻蛋白的作用突出（Duman *et al*., 2004）。在本研究中，重阳木锦斑蛾幼虫在越冬前期蛋白质含量较低，随着越冬时间的延长，蛋白质含量逐渐升高，至 1 月份含量最高，显著高于越冬前期，随后含量逐渐下降。在赤松毛虫 *Dendrolimus spectabilis*、松皮天牛 *Rhagium inquisitor* 等昆虫的越冬期间，其体内蛋白质含量也有类似的变化（韩瑞东等，2005; Kristmnsen *et al*., 2005）。这可能是由于越冬期间虫体通过合成蛋白质来增强自身对外界不利环境的抵抗能力，从而安全度过越冬阶段（欧阳芳和戈峰，2014）。据此可以推断，该虫耐寒策略可能是通过合成蛋白质以降低过冷却点和结冰点来提高其耐寒能力。本研究只测定了虫体内的蛋白质总量，下一步研究工作应确定其体内抗冻蛋白的种类及含量变化。

重阳木锦斑蛾越冬幼虫体内生化物质含量的变化不仅与其生理代谢有关，也与外界温度变化有关。本研究基本揭示了重阳木锦斑蛾幼虫在越冬前后耐寒性的变化规律，对分析其地理分布具有一定的理论指导意义。另外，许多越冬昆虫的抗寒物质变化与滞育状态有关（Denlinger, 1991），而重阳木锦斑蛾以老熟幼虫休眠状态越冬，其越冬抗寒物质的变化与休眠状态的关系尚待研究。在野外越冬调查时发现，其以老熟幼虫在重阳木树干裂缝或其他矮生灌木叶片正面作茧，或在地面落叶上、附近建筑物的棱角处结茧，不同越冬场所以及方位对其耐寒性是否有影响，也需要在接下来的研究中进一步探讨。

参考文献（References）

Bale JS, 2002. Insects and low temperatures: from molecular biology to distributions and abundance. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 357(1423): 849 - 862.

Cui SS, He YY, 2011. Insect cold hardiness and the influencing factors. *Life Sci. Res.*, 15(3): 273 - 276. [崔双双, 贺一原, 2011. 昆虫的耐寒性及其影响因素. 生命科学研究, 15(3): 273 - 276]

Denlinger DL, 1991. Relationship between cold hardiness and diapause. In: Lee RE, Denlinger DL eds. Insects at Low Temperature. Chapman and Hall, New York. 174 - 198.

Duman JG, Bennett V, Sformo T, Hochstrasser R, Barnes BM, 2004. Antifreeze proteins in Alaskan insect and spiders. *J. Insect Physiol.*, 50(4): 259 - 266.

Fan M, 2013. Life history and population dynamics of *Histia rhodope* in Shanghai. *Acta Agric. Shanghai*, 29(5): 122 - 124. [樊敏, 2013. 上海地区重阳木帆锦斑蛾生活史及种群动态. 上海农业学报, 29(5): 122 - 124]

Feng YQ, Xu LL, Li WB, Xu ZC, Cao M, Wang JL, Tao J, Zong SX, 2016. Seasonal changes in supercooling capacity and major cryoprotectants of overwintering Asian longhorned beetle (*Anoplophora glabripennis*) larvae. *Agr. For. Entomol.*, 18(3): 302 - 312.

Feng YQ, Zhang L, Li WB, Yang X, Zong SX, 2018. Cold hardiness of overwintering larvae of *Sphenoptera* sp. (Coleoptera: Buprestidae) in western China. *J. Econ. Entomol.*, 111(1): 247 - 251.

Guo HB, Xu YX, Ju Z, Li MG, 2006. Seasonal changes of cold hardiness of the green lacewing, *Chrysoperla sinica* (Tjeder) (Neuroptera: Chrysopidae). *Acta Ecol. Sin.*, 26(10): 3240 - 3243. [郭海波, 许永玉, 鞠珍, 李明贵, 2006. 中华通草蛉成虫抗寒能力季节性变化. 生态学报, 26(10): 3240 - 3243]

Han RD, Sun XG, Xu YY, Zhang WG, 2005. The biochemical mechanism of cold-hardiness in overwintering larvae of *Dendrolimus spectabilis* (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Acta Ecol. Sin.*, 25(6): 1352 - 1356. [韩瑞东, 孙绪艮, 许永玉, 张卫光, 2005. 赤松毛虫越冬幼虫生化物质变化与抗寒性的关系. 生态学报, 25(6): 1352 - 1356]

Huang BK, 1980. A study on the bionomic characteristics and control of the bischofia burnet *Histia rhodope* Cramer. *J. Fujian Agric. Coll.*, (1): 61 - 79. [黄邦侃, 1980. 重阳木斑蛾的生物学及防治研究. 福建农学院学报, (1): 61 - 79]

Jing XH, Kang L, 2002. Research progress in insect cold hardiness. *Acta Ecol. Sin.*, 22(12): 2202 - 2207. [景晓红, 康乐, 2002. 昆虫耐寒性研究. 生态学报, 22(12): 2202 - 2207]

Jing XH, Kang L, 2004. Overview and evaluation of research methodology for insect cold hardiness. *Entomol. Knowl.*, 40(1): 7 - 10. [景晓红, 康乐, 2004. 昆虫耐寒性的测定与评价方法. 昆虫知识, 40(1): 7 - 10]

Kristmnsen E, Ramlov H, Hagen L, Pedersen SA, Andersen RA, Zachariassen KE, 2005. Isolation and characterization of hemolymph antifreeze proteins from larvae of the longhorn beetle *Rhagium inquisitor* (L.). *Comp. Biochem. Physiol. B*, 142(1): 90 - 97.

Lee RE, 1991. Principles of insect low temperature tolerance. In: Lee RE, Denlinger DL eds. Insects at Low Temperature. Chapman and Hall, USA. 17 - 46.

Li SG, Lin HF, Li LH, Deng XR, Chen YH, Chen SY, 2006. Bionomics of *Histia rhodope* and its control. *Chin. Bull. Entomol.*, 43(6): 777 - 780. [李世广, 林华峰, 李利华, 邓小荣, 陈永华, 陈世玉, 2006. 重阳木帆锦斑蛾的生物学特性及防治. 昆虫知识, 43(6): 777 - 780]

Li YX, 2013. Threshold temperature and effective accumulate temperature of *Histia rhodope*. *J. Anhui Agric. Sci.*, 41(16): 7159 - 7160. [李玉秀, 2013. 重阳木锦斑蛾的发育起点温度和有效积温研究. 安徽农业科学, 41(16): 7159 - 7160]

Liu YJ, Zhang TT, Bai SX, He KL, Wang ZY, 2014. Changes of cold hardiness of the overwintering larvae of *Athetis lepigone* (Lepidoptera: Noctuidae) at different overwintering stages. *Acta Entomol. Sin.*, 57(3): 379 - 384. [刘玉娟, 张天涛, 白树雄, 何康来, 王振营, 2014. 越冬期不同阶段二点委夜蛾越冬幼虫耐寒性变化. 昆虫学报, 57(3): 379 - 384]

Liu ZL, Yuan ZL, Luo L, 2017. Changes in the cold hardiness and contents of the related biochemical substances in female adults of *Ceroplastes japonicus* (Hemiptera: Coccoidea) before and after overwintering. *Acta Entomol. Sin.*, 60(1): 120 - 126. [刘兆良, 袁忠林, 罗兰, 2017. 日本龟蜡蚧雌成虫越冬前后耐寒性及相关生化物质含量的变化. 昆虫学报, 60(1): 120 - 126]

Mohammadzadeh M, Borzoui E, Izadi H, 2017. Physiological and biochemical differences in diapausing and nondiapausing larvae of *Eurytoma plotnikovi* (Hymenoptera: Eurytomidae). *Environ. Entomol.*, 46(6): 1424 - 1431.

Ouyang F, Ge F, 2014. Methodology of measuring and analyzing insect cold hardiness. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 51(6): 1646 - 1652. [欧阳芳, 戈峰, 2014. 昆虫抗冻耐寒能力的测定与分析方法. 应用昆虫学报, 51(6): 1646 - 1652]

Qiang CK, Du YZ, Yu LY, Cui YD, Lu MX, Zheng FS, 2008. Dynamic changes of cold-resistant substances of overwintering *Chilo suppressalis* (Walker). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 19(3): 599 - 605. [強承魁, 杜予州, 于玲雅, 崔亚东, 陆明星, 郑福山, 2008. 水稻二化螟越冬幼虫耐寒性物质的动态变化. 应用生态学报, 19(3): 599 - 605]

Qin ZP, Song GJ, Liu P, Li GP, Liang X, Wang HT, 2018. Experimental study on pesticides control of *Histia rhodope* Cramer. *J. Shandong For. Sci. Tech.*, 238(5): 78 - 80. [秦昭鹏, 宋刚坚, 刘鹏, 李观鹏, 梁星, 王海涛, 2018. 重阳木锦斑蛾药剂防治试验. 山东林业科技, 238(5): 78 - 80]

Ren XY, Zhang LS, Qi XY, An T, Han YH, Chen HY, 2015. Metabolic adaption and evaluation of cold hardiness on diapausing ladybird, *Coccinella septempunctata* L. *J. Environ. Entomol.*, 37(6): 1195 - 1202. [任小云, 张礼生, 齐晓阳, 安涛, 韩艳华, 陈红印, 2015. 滞育七星瓢虫的代谢适应与抗寒性评价. 环境昆虫学报, 37(6): 1195 - 1202]

Saeidi M, Moharramipour S, 2017. Physiology of cold hardiness, seasonal fluctuations, and cryoprotectant contents in overwintering adults of *Hypera postica* (Coleoptera: Curculionidae). *Environ. Entomol.*, 46(4): 960 - 966.

Shi CH, Hu JR, Li CR, Zhang YJ, 2016. Research progress in the cold

tolerance mechanism of insects under environmental stress. *Plant Prot*., 42(6): 21 – 28. [史彩华, 胡静荣, 李传仁, 张友军, 2016. 环境胁迫下昆虫的耐寒适应机制研究进展. 植物保护, 42(6): 21 – 28]

Sinclair BJ, 2015. Linking energetics and overwintering in temperate insects. *J. Therm. Biol*., 54: 5 – 11.

Sømme L, 1996. The effect of prolonged exposures at low temperatures in insects. *Cryo-Lett*., 17(6): 341 – 346.

Wang DY, Ru YT, Wang Y, Ma YY, Na S, Sun LZ, Jiang YR, Qin L, 2018. Gene expression patterns and activities of trehalases in *Antheraea pernyi* (Lepidoptera: Saturniidae) pupae during diapause and diapause termination. *Acta Entomol. Sin*., 61(7): 784 – 794. [王德意, 汝玉涛, 王勇, 马月月, 那爽, 孙良振, 姜义仁, 秦利, 2018. 柞蚕蛹滞育和滞育解除过程中海藻糖酶基因表达模式及酶活力分析. 昆虫学报, 61(7): 784 – 794]

Wang J, Guo GQ, Zhang RR, Dai LL, Chen H, 2017. Metabolism and cold tolerance of Chinese white pine beetle *Dendroctonus armandi* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) during the overwintering period. *Agr. For. Entomol*., 19(1): 10 – 22.

Wang XH, Kang L, 2005. Differences in egg thermotolerance between tropical and temperate populations of the migratory locust *Locusta migration* (Orthoptera: Acridiidae). *J. Insect Physiol*., 51(11): 1277 – 1285.

Worland MR, 1996. The relationship between water content and cold tolerance in the arctic collembolan *Onychiurus arcticus* (Collembola: Onychiuridae). *Eur. J. Entomol*., 93(3): 341 – 348.

Xu S, Wang ML, Sing N, Ma WH, Li YN, Lei CL, Wang XP, 2011. Relationships between body weight of overwintering larvae and supercooling capacity; diapause intensity and post-diapause reproductive potential in *Chilo suppressalis* Walker. *J. Insect Physiol*., 57(5): 653 – 659.

Zachariassen KE, Li NG, Laugsand AE, Kristiansen E, Pedersen SA, 2008. Is the strategy for cold hardiness in insects determined by their water balance? A study on two closely related families of beetles, Cerambycidae and Chrysomelidae. *J. Comp. Physiol. B*, 178(8): 977 – 984.

Zhao J, Yu LY, Li M, Zheng FQ, Zhang F, Xu YY, 2008. Seasonal variation in cold tolerance of the multicolored ladybeetle, *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae) adults. *Acta Entomol. Sin*., 51(12): 1271 – 1278. [赵静, 于令媛, 李敏, 郑方强, 张帆, 许永玉, 2008. 异色瓢虫成虫耐寒能力的季节性变化. 昆虫学报, 51(12): 1271 – 1278]

(责任编辑: 赵利辉)